ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 204 1971

ВЫБОР ТОЛЩИНЫ БУМАЖНОГО ЛИСТА БУМАЖНО-МАСЛЯНЫХ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

В. С. ДМИТРЕВСКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедры электроизоляционной и кабельной техники)

В силовых конденсаторах находит широкое применение бумажно-масляная изоляция.

Выбор рабочей напряженности поля и толщины бумажного листа определяют габариты и стоимость конденсатора. В целях получения наивыгоднейших размеров минимальной стоимости и наибольшей долговечности конденсатора производят расчет нескольких вариантов, из которых выбирают экономически наиболее целесообразный. Естественно, что такой расчет требует большей затраты времени.

В связи с указанным поставлена задача — найти связь между толщиной бумажного листа, допустимой рабочей напряженностью поля, параметрами конденсатора и его стоимостью.

Стоимость конденсатора с бумажно-масляной изоляцией найдется

$$Ц_к = Ц_б + Ц_ф + Ц_п + Ц_{корп} + Ц_{из} + Ц_{пр}, \quad (1)$$

где $Ц_б$, $Ц_ф$, $Ц_п$, $Ц_{корп}$, $Ц_{из}$, $Ц_{пр}$ — стоимость бумаги фольги, пропитки, корпуса, изоляции от корпуса, проходного изолятора соответственно.

Следует отметить, что последние три составляющих невелеки и практически не зависят (или мало зависят) от толщины бумажного листа. Поэтому в дальнейшем мы приближенно будем считать, что стоимость конденсатора приближенно равна

$$Ц_к = Ц_б + Ц_{пр} + Ц_ф. \quad (1а)$$

Чтобы определить стоимость отдельных составляющих, необходимо найти их объем.

Исходными данными для расчета являются рабочее напряжение $U_к$ и емкость конденсатора $C_к$.

Допустимая рабочая напряженность поля в конденсаторе найдется [1]

$$E_р = 3{,}6 \left(\frac{n\delta}{\kappa_п} \right)^{-0{,}58} \quad (2)$$

где

δ — толщина бумажного листа;

n — число листов между обкладками;

$\kappa_п$ — коэффициент запрессовки, $E_р$ в *кв/мм*.

Число последовательных секций в конденсаторе

$$m = \frac{U_к}{U_с} = \frac{U_к}{\frac{n\delta}{\kappa_п} E_р} = \frac{U_к}{3{,}6\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}\right)^{0{,}42}} \tag{3}$$

в этом выражении $U^к$, в *кв*.

Емкость секции рулонного типа определим [2]

$$C_с = 1{,}77 \cdot 10^{-8} \frac{\varepsilon b \Delta}{2\,\frac{n\delta}{\kappa_п}\left(\frac{n\delta}{\kappa_п} + d_{ср}\right)}\left(l - \frac{\pi}{4}\Delta\right), \tag{4}$$

где

$C_с$ — емкость секции в *мкф*;
ε — относительная диэлектрическая проницаемость пропитанной бумаги;
b — ширина фольги, в *мм*;
Δ — толщина секции, в *мм*;
$d_{ср}$ — толщина фольги, в *мм*;
l — длина секции, в *мм*.

Число параллельных секций найдется

$$p = m\frac{C_к}{C_с} = \frac{U_к C_к \left(\frac{n\delta}{\kappa_п}\right)^{0{,}58}\left(\frac{n\delta}{\kappa_п} + d_{ср}\right)}{3{,}2 \cdot 10^{-8}\,\varepsilon b \Delta\left(l - \frac{\pi}{4}\Delta\right)}. \tag{5}$$

Объем бумаги в конденсаторе определяется

$$V_б = pmL\,(b + 2b_з)\,n\delta = \frac{U_к^2\,C_к\,n\delta\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}\right)^{0{,}16}}{23 \cdot 10^{-8}\,\varepsilon} \cdot \frac{b + 2b_з}{b}, \tag{6}$$

где $b_з$ — ширина закраины;
L — длина обкладки в конденсаторной секции, которая находится

$$L = \frac{\Delta}{2\left(\frac{n\delta}{\kappa_п} + d_{ср}\right)}\left(l - \frac{\pi}{4}\Delta\right). \tag{7}$$

Объем фольги в конденсаторе

$$V_ф = pmLbd_{ср} = \frac{U_к^2 C_к\, d_{ср}\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}\right)^{0{,}16}}{23 \cdot 10^{-8}\,\varepsilon}. \tag{8}$$

Расположим секции конденсатора так, чтобы высота пакета равнялась $m\Delta$, ширина — l и длинн $p(b + 2b_з)$. Естественно можно принять и другое расположение секций в конденсаторе. Пропитывающий состав расходуется на пропитку бумаги секций и пропитку изоляций секций от корпуса

$$V_{пр} = 2\kappa_2\, lm\Delta\Delta_1 + 2\kappa_2 pm\,(b + 2b_з)\,\Delta\Delta_1 + \\ + 2\kappa_2 p\,(b + 2b_з)\,l\Delta_1 + \kappa_1 V_б =$$

$$= \frac{\kappa_2\, l\,\Delta\Delta_1\, U_к}{1{,}8\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}\right)^{0{,}42}} + \frac{\kappa_2\, U_к^2\, C_к\, \Delta_1\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}\right)^{0{,}16}\left(\frac{n\delta}{\kappa_п} + d_{ср}\right)}{5{,}7 \cdot 10^{-8}\,\varepsilon\left(l - \frac{\pi}{4}\Delta\right)} \frac{b + 2b_з}{b} + \tag{9}$$

$$+\frac{\kappa_2 U_к C_к l\Delta_1\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}\right)^{0.58}\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}+d_{ср}\right)}{1{,}6\cdot10^{-8}\varepsilon\Delta\left(l-\frac{\pi}{4}\Delta\right)}\frac{b+2b_з}{b}+$$

$$+\frac{\kappa_1 U_к^2 C_к n\delta\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}\right)^{0,16}}{2{,}3\cdot10^{-8}\varepsilon}\frac{b+2b_з}{b}.$$

В этом выражении:

Δ_1 — толщина изоляции от корпуса;

κ_1; κ_2 — коэффициенты пропитки секции и изоляции от корпуса соответственно.

Все линейные размеры в формулах (6), (8), (9) подставляются в *мм* и объемы имеют размеры в *мм*^{3}.

Умножая объемы соответствующих материалов на их плотность и стоимость единицы веса, можно получить цену конденсатора. Необходимо учитывать, что стоимость бумаги зависит от толщины бумажного листа. Для бумаги КОН-1, которая применяется для изготовления силовых конденсаторов, зависимость стоимости от толщины бумажного листа может быть выражена

$$S_б = 1{,}32 + 62{,}3\,e^{\frac{-1{,}7\delta}{0{,}004}}\left[\frac{\text{руб}}{кГ}\right]. \qquad (10)$$

Находя стоимость бумаги, фольги и пропитывающего состава и подставляя их в выражение (1а,), окончательно получим:

$$Ц_к = V_б\gamma_б S_б + V_ф\gamma_ф S_ф + V_{пр}\gamma_{пр}S_{пр} =$$

$$= \frac{U_к^2 C_к n\delta\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}\right)^{0,16}}{2{,}3\cdot10^{-8}\varepsilon}\frac{b+2b_з}{b}\gamma_б\left(1{,}32+62{,}3\,e^{\frac{1.7\,\delta}{0{,}004}}\right)10^{-6}+$$

$$+\frac{U_к^2 C_к d_{ср}\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}\right)^{0,16}}{2{,}3\cdot10^{-8}\varepsilon}\gamma_ф S_ф\,10^{-6}+\frac{\kappa_2 l\,\Delta\Delta_1 U_к}{1{,}8\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}\right)^{0{,}42}}\gamma_{пр}S_{пр}\,10^{-6}+$$

$$+\frac{\kappa_2 U_к C_к\Delta_1 l\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}\right)^{0{,}58}\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}+d_{ср}\right)}{1{,}6\cdot10^{-8}\varepsilon\Delta\left(l-\frac{\pi}{4}\Delta\right)}\frac{b+2b_з}{b}\gamma_{пр}S_{пр}\,10^{-6}+$$

$$+\frac{\kappa_2 U_к^2 C_к\Delta_1\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}\right)^{0,16}\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}+d_{ср}\right)}{5{,}7\cdot10^{-8}\varepsilon\Delta\left(l-\frac{\pi}{4}\Delta\right)}\frac{b+2b_з}{b}\gamma_{пр}S_{пр}\,10^{-6}+$$

$$+\frac{\kappa_1 U_к^2 C_к n\delta\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}\right)^{0,16}}{23\cdot10^{-8}\varepsilon}\frac{b+2b_з}{b}\gamma_{пр}S_{пр}\,10^{-6}. \qquad (11)$$

Анализ уравнения (11) показывает, что стоимость конденсатора с увеличением толщины бумажного листа изменяется по кривой

с минимумом. Для нахождения толщины бумажного листа, соответствующего минимуму стоимости конденсатора, возьмем производную $\frac{dЦ_к}{d\delta}$ и приравняем ее нулю. После преобразований, пренебрегая малыми составляющими, получим:

$$1{,}53\,\kappa_п\,\gamma_б + 0{,}16\,\kappa_п \frac{d_ф\,\gamma_ф\,S_ф}{n\delta}\,\frac{b}{b+2b_3} + 4{,}68\,\frac{\kappa_2\,\Delta_1\,S_{пр}\,\gamma_{пр}}{l-\frac{\pi}{4}\Delta} +$$

$$+ 22{,}7\,\frac{\kappa_2\,l\,\Delta_1\,\gamma_{пр}\,S_{пр}}{U_к\,\Delta\left(l-\frac{\pi}{4}\Delta\right)}\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}\right)^{0{,}42} + 1{,}6\;\kappa_1\,\kappa_п\,\gamma_{пр}\,S_{пр} =$$

$$= (26500\,\delta - 72{,}3)\,\gamma_б\,\kappa_п\,e^{\frac{-1{,}7\,\delta}{0{,}004}} \qquad (12)$$

Размеры секции, как следует из уравнения (12), мало влияют на выбор наивыгоднейшей толщины бумажного листа. Это позволяет выбирать размеры секций из соображений наилучшего теплоотвода, получения наиболее компактной конструкции.

Решение уравнения (12) можно выполнить, задавшись размерами секции l, b, Δ и толщиной изоляции от корпуса Δ_1. Целесообразно решение уравнения (12) провести графическим путем, задаваясь различными значениями δ. Следует отметить, что наивыгоднейшее значение n принимается в пределах 4—10.

Проведенные расчеты показали, что наивыгоднейшее значение толщины бумаги для силовых конденсаторов находится в пределах 10—12 *мк*.

Дифференцируя уравнение (11) по l или Δ, можно найти значение l и Δ соответствующее минимуму стоимости конденсатора.

Полагая $\frac{dЦ_к}{d\Delta} = 0$, получим формулу для определения Δ соответствующей минимуму стоимости конденсатора

$$\Delta = 2{,}13\,\frac{l\left(\frac{n\delta}{\kappa_п}\right)^{0{,}21}}{\sqrt{U_к}}. \qquad (13)$$

Однако величина Δ ограничивается технологическими требованиями и не учитывает стоимости изготовления конденсатора. Поэтому формула (13) может быть использована только для ориентировочных расчетов.

В данной работе найдена связь между стоимостью конденсатора и его размерами. Получено уравнение, позволяющее найти оптимальную толщину бумажного листа, исходя из минимума затрат на материалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Грейсух, Г. С. Кучинский, Д. А. Каплан, Г. Т. Мессерман Бумажно-масляная изоляция в высоковольтных конструкциях. Госэнергоиздат, 1963
2. В. Т. Ренне, Ю. В. Багалей, И. Д. Фридберг. Расчет и конструирование конденсаторов. Изд. «Техника», Киев, 1966.